

동익 피치각 및 디퓨저 각도가 축류팬의 공력 성능에 미치는 영향

양상호* · 김경엽** · 허만웅***†

Effects of Rotor Blade Pitch Angle and Diffuser Angle on the Aerodynamic Performance of an Axial Flow Fan

Sang-Ho Yang*, Kyung-Yup Kim**, Man-Woong Heo***†

Key Words : Axial Flow Fan(축류팬), Diffuser Angle(디퓨저 각도), Efficiency(효율), Pitch Angle(피치각),
RANS Equations(레이놀즈 평균 나비에-스톡스 방정식)

ABSTRACT

In present study, effects of rotor blade pitch angle and diffuser angle on aerodynamic performance of a jet fan have been investigated numerically using three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. The shear stress transport turbulence model was used for the analysis of turbulence. The finite volume method and unstructured hexahedral grids was used in the numerical analysis. Optimal grid system in the computational domain was selected through a grid-dependency test. From the results of the flow analysis, it was found that the performance of a jet fan is very sensitive to the rotor pitch angle. Finally, performance test has been carried out for a jet fan with the geometric parameters having best performance among the cases tested in numerical analysis.

1. 서 론

축류팬이나 제트팬(Jet Fan)은 고속도로 터널의 환기실 또는 터널 및 지하차도의 벽면 등에 설치되어 고속의 바람을 일으켜 터널 내 오염공기를 밖으로 분출시키는 횡류식, 반횡류식, 종류식 환기에 사용되는 송풍기이다. 주행 안전성과 쾌적성 확보를 위한 공익목적의 송풍기로 사용되지만 터널 내 화재 발생 시에는 정회전 또는 역회전하여 화재의 성장에 따라 역기류를 발생하지 않고 연기를 제연할 수 있는 제연팬의 기능을 갖는다. 이러한 터널 내부에 설치된 축류팬에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다.

Chun 등⁽¹⁾은 터널 내에 다수의 축류팬을 설치할 경우 상호간 미치는 영향성을 분석하기 위해 평행하게 위치한 축류팬들의 서지(surge)와 실속(stall)에 대한 연구를 수행하였

고, Karki 등⁽²⁾은 터널 내 화재발생 상황에서 제트팬에 의한 터널 내부 유동특성을 분석하기 위해 수치해석을 수행하고 실험 결과와 비교하였다. Se 등⁽³⁾은 제트팬의 설치위치 변화가 터널 내 화재의 구조에 미치는 영향을 수치해석을 통해 조사하였다. Betta 등⁽⁴⁾은 터널 천정에 설치한 제트팬의 출구 각도 변화가 터널 내 환기에 미치는 영향을 분석하기 위한 수치해석을 수행하였고, Mutama와 Hall⁽⁵⁾은 터널 내부에 설치된 제트팬의 벽으로부터의 거리 변화에 따른 터널 내의 유동 특성을 분석하였다.

이와 같이 터널 내 유동특성에 대한 제트팬의 영향성을 분석하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있지만 제트팬의 공력학적 성능 특성에 대한 연구는 드물게 수행되고 있다. 양상호 등⁽⁶⁾은 해저터널용 고정압 축류팬을 설계하기 위하여 상사법칙을 활용한 축류팬의 개발 과정을 검증하였고, 수치해

* 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원, (주)삼원이앤비 기술연구소(Graduate School of Knowledge-based Technology and Energy, Korea Polytechnic University, Samwon E&B Co., Ltd.)

** 한국산업기술대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

*** 건설기계부품연구원(Korea Construction Equipment Technology Institute)

† 교신저자, E-mail : heomanwoong@gmail.com; mwheo@koceti.re.kr

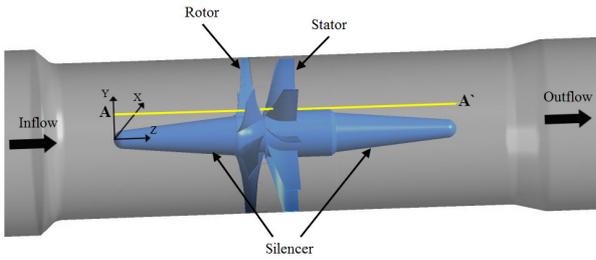


Fig. 1 Computational domain of a jet fan

Table 1 Design specifications of the jet fan

Diameter of casing, mm		1,400
Diameter of impeller, mm		1,392
Hub tip ratio, %		29
Air volume, m ³ /s		46.1
Differential pressure, Pa		540
Rotational speed, rpm		1,185
Specific speed		3,076
Number of blades, EA	Rotor	6
	Stator	9

석을 활용하여 동익과 정익의 개수, 팁 간극, 정익의 형상 변화에 따른 제트팬의 성능 변화를 Choi 등⁽⁷⁾이 분석하였다. 양상호 등⁽⁸⁾은 제트팬의 정방향 운전성능을 향상시키기 위하여 Clark-Y계열의 하현 휨 익형(bottom cambered airfoil)을 채택하고 기존 제트팬과 비교하여 동력을 약 18~26% 감소시킨 결과를 도출하였다.

가역성능을 갖는 제트팬은 임펠러의 날개형상이 대칭 또는 근사대칭에 가까우므로 축류송풍기의 성능을 나타내는 양력(drag force)의 상승에 한계가 있어 그다지 효율이 높지 못하다. 제트팬은 일반적으로 방재기능을 위해 가역성능을 갖도록 개발되고 있지만 정회전과 역회전의 성능이 동일하지 않더라도 역회전 시에 정회전 성능의 60% 이상의 성능을 가지면 비상시 역회전을 하여 제연기능을 충분히 수행할 수 있기 때문에 유럽 선진국에서는 이에 대한 개발이 진행되고 있다. 이에 따라 가역성능이 동일한 제트팬과 함께 가역성능이 다른 일방향 회전익(uni-directional impeller)을 갖는 제트팬에 대한 체계적인 개발이 진행되어야 한다.

본 연구에서는 일방향 제트팬의 유동특성을 평가하기 위하여 삼차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 해석을 수행하였다. 그리고 Fig. 4와 같이 동익(rotor)의 (+) 방향 피치각(pitch angle, β_c) 및 (-)방향 피치각, 디퓨저 각도(diffuser angle)의 변화가 제트팬의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 가장 좋은 성능을 보이는 형상변수들을 갖는 제트팬에 대해 성능시험을 수행하였다.

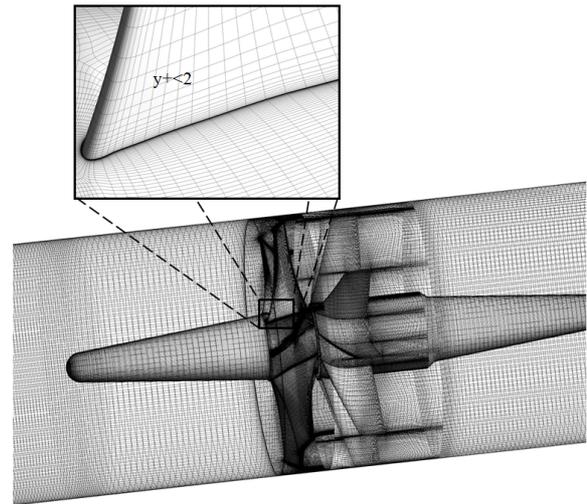


Fig. 2 Structure of the grid system

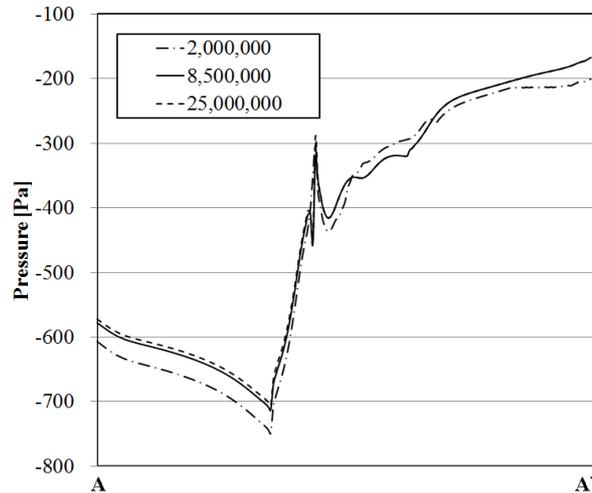


Fig. 3 Results of grid-dependency test

2. 수치해석방법

2.1 유동해석방법

본 연구에서는 일방향 슬립형 제트팬의 동익 피치각 및 디퓨저 각도의 변화에 따른 공력학적 특성을 분석하기 위하여 유동장을 비압축성 삼차원 정상상태로 가정하고 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-16.0⁽⁹⁾을 사용하여 삼차원 정밀 유동해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 일방향 제트팬의 유동해석을 위한 계산영역은 Fig. 1에 도식화 하였다. 일방향 제트팬은 소음기, 동익 및 정익(stator)으로 구성되며, 계산영역은 회전영역(임펠러, 전동기)과 정지영역(입구 벨마우스, 소음기, 정익 및 출구 소음기, 디퓨저)을 구분하여 구성하였다. 제트팬은 6개의 동익과 9개의 정익을 갖고 있으며, 임펠러의 직경은 1,392 mm, 케이싱의 직경은 1,400 mm이다. 동익은

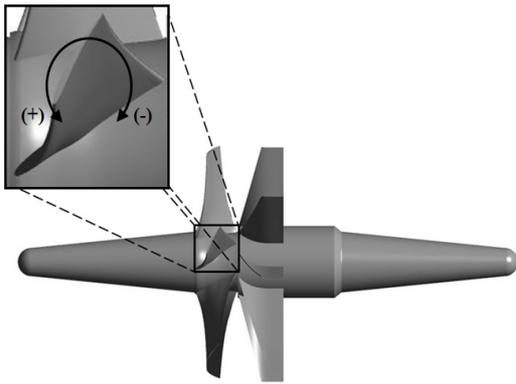


Fig. 4 Definition of variation of the rotor blade pitch angle (β_c)

1,185 rpm의 속도로 회전하며, 허브 비는 0.29이다. 일방향 제트팬에 대한 자세한 설계사양은 Table 1에 나타내었다.

유동해석을 위해 작동유체는 표준상태의 25℃ 공기로 가정하였으며, 계산 영역의 입구와 출구에는 각각 전압력(total pressure)과 정압력(static pressure) 경계조건을 적용하였다. 회전영역과 고정영역 사이의 경계면 처리는 고정 회전자 기법(frozen-rotor method)을 적용하여 계산 값을 그대로 정지좌표계에 입력 값으로 사용하도록 하였고, 모든 벽면에는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 난류 해석을 위해서는 SST(shear stress transport) $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. SST 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점을 결합한 것으로 벽 근처 영역에는 $k-\omega$ 모델을 사용하고 벽 근처를 제외한 영역에서는 $k-\epsilon$ 모델을 사용하게 된다.

본 연구의 수치해석을 위한 계산영역에 대한 격자계는 Fig. 2에 나타내었다. 계산영역은 육면체 격자를 사용하여 구성하였으며, 벽면 첫 번째 격자점에서의 $y+$ 값이 2이하로 유지되도록 하였다. Fig. 3은 계산 결과에 대한 격자의 의존성을 배제시키기 위하여 수행한 격자의존성시험 결과를 보여준다. A-A 선(Fig. 1) 위에서의 압력분포를 격자 수 2,000,000~25,000,000개 범위에서 변화시켜 비교하였으며, 약 8,500,000개의 격자 수 이상에서 계산 결과의 차이를 보이지 않아 수치해석을 위한 최적의 격자크기로 결정하였다.

모든 해석은 질량보존방정식의 RMS(root mean square) 잉여값(residual)이 $10E-6$ 이하가 되었을 때 만족스러운 수렴 값을 도출할 수 있었다.

3. 결과 및 검토

3.1 성능시험 결과 비교

일방향 제트팬의 성능시험 결과를 수치해석 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 전압력의 경우 수치해석 결과는 시험결과와 비교하여 약 2.3% 증가한 값을 예측하였으며,

Table 2 Comparison between numerical results and Exp. data

	CFD	Exp.	Discrepancy (%)
Air Volume (m^3/s)	46.1	47.2	2.3
Total Pressure (Pa)	580	567	2.3
Shaft Power (kW)	30.3	30.8	1.6
Efficiency (%)	88.3	86.9	1.6

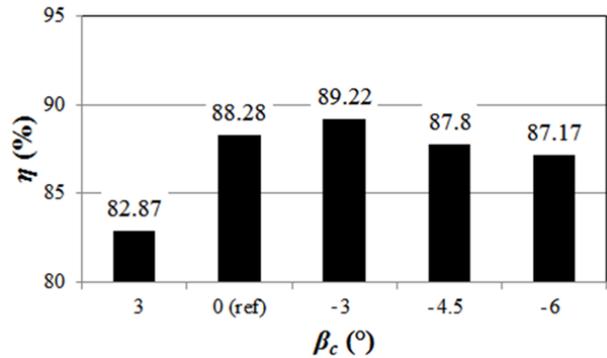


Fig. 5 Efficiency for different rotor blade pitch angle (β_c)

동력의 경우 약 1.6% 감소한 결과를 보여주었다. 이를 통해 수치해석 결과는 시험결과와 비교하여 약 1.4% 증가한 효율 값을 예측하였다. 수치해석 결과와 시험결과와의 전압력은 약 2.3%의 오차를 보이고, 동력과 효율은 1.6%의 오차를 보이며 잘 일치하였다.

3.2 동익 피치각도 변화의 영향성 분석

일방향 제트팬의 공력학적 특성에 동익 피치각(β_c)의 영향성을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같이 동익의 피치각을 변경하였다. 성능시험을 수행한 SJF-1400 일방향 제트팬의 형상을 기준으로 피치각을 $+3.0^\circ$, 0° , -3.0° , -4.5° , 그리고 -6.0° 로 변경시켜 이들의 영향을 평가하였다.

동익 피치각 변화에 따른 일방향 제트팬의 성능에 대한 영향을 분석하기 위해 다음과 같이 정의된 제트팬의 효율(efficiency, η)을 성능함수로서 고려하였다.

$$\eta = \frac{(P_{out} - P_{in}) \cdot Q}{\tau \cdot \omega} \quad (1)$$

여기서, P , Q , τ , 그리고 ω 는 각각 전압력, 유량, 토크, 그리고 각속도를 나타내며 각각의 단위는 Pa, m^3/min , $N \cdot m$, rad/s 로 표시한다.

동익의 피치각 변화에 따른 일방향 제트팬의 성능 변화는 Fig. 5에 보여진다. β_c 가 감소함에 따라 일방향 제트팬의 효율이 증가하는 경향을 보이며 β_c 를 3.0° 감소시킬 경우에서 가장 큰 효율 값을 보인다. 그러나 β_c 를 4.5° 이상 감소시키

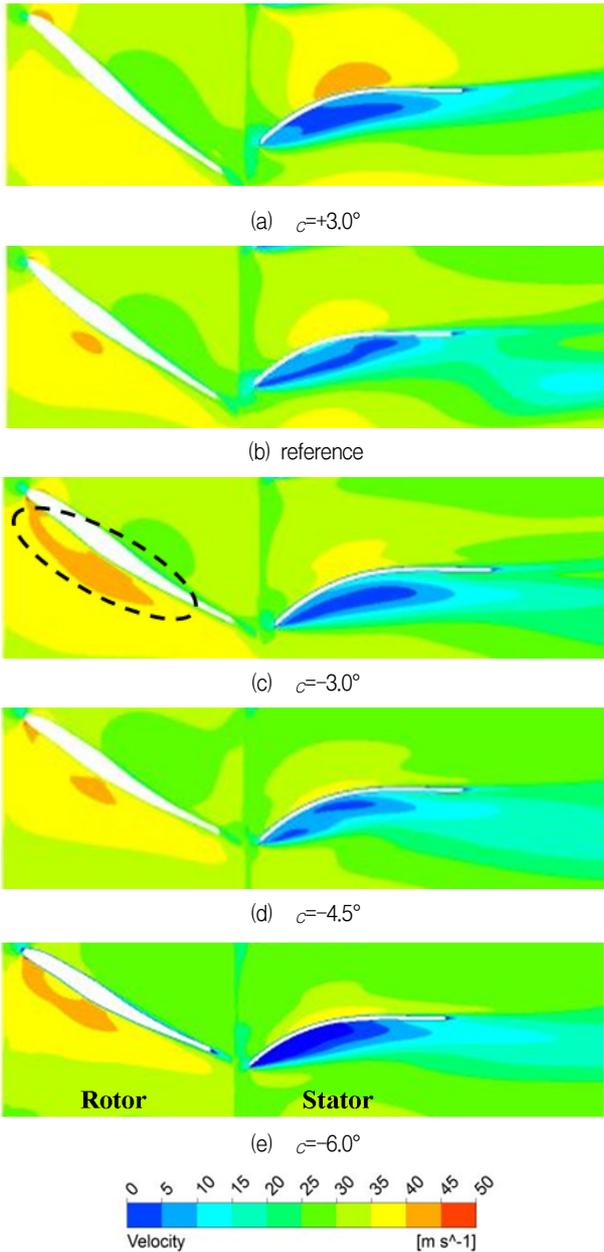


Fig. 6 Velocity contours on the 10% span for different blade pitch angles

면 제트팬의 효율이 감소하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 유동해석 결과는 동익의 피치각을 3.0° 더 감소시킬 경우 기준형상과 비교하여 효율이 약 0.9% 증가한 결과를 보여준다. Fig. 6은 β_c 를 변화시킴에 따라 동익과 정익의 10% span에서의 속도장 분포를 각각 비교하여 보여준다.

$\beta_c = +3.0^\circ$ 의 경우(Fig. 6(a)), 제트팬의 정익의 압력면(pressure surface) 근처에 매우 낮은 속도장 분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 낮은 속도분포는 유동박리 현상과 관련되며, 제트팬 성능을 낮추는 요인을 작용할 수 있다. 이러한 정익의 압력면 근처에서 나타난 낮은 속도분포를 갖는 영역은 β_c 가 감소함에 따라 점차 줄어드는 경향을 보이지만 $\beta_c = -6.0^\circ$ 의 제트팬에서 다시 커지는 것을 확인할

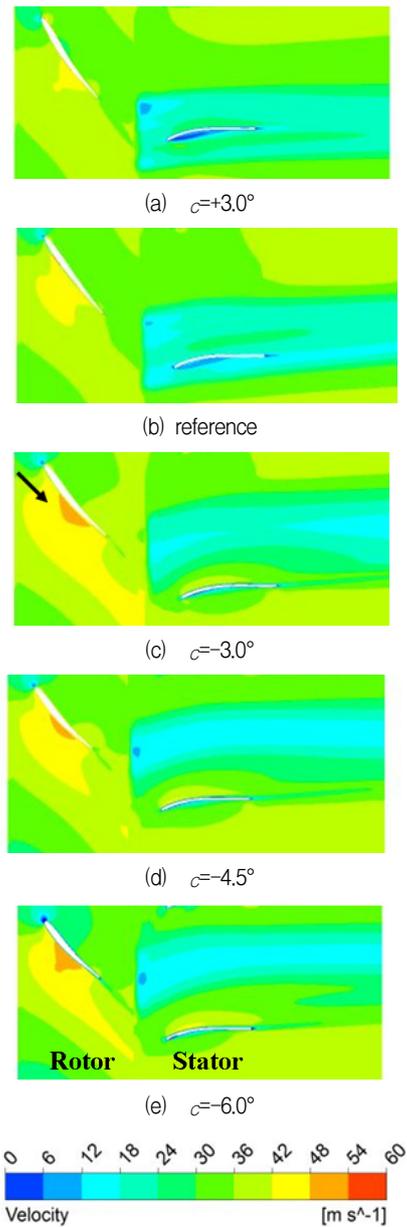


Fig. 7 Velocity contours on the 50% span for different blade pitch angles

수 있었다.

또한, 동익의 흡입면(suction surface)을 살펴보면 β_c 가 감소함에 따라 속도가 증가하는 것을 확인할 수 있으며 $\beta_c = -4.5^\circ$ 이후에 이러한 높은 속도를 갖는 영역이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 β_c 의 변화에 따른 동익과 정익의 50% span에서의 속도분포를 비교하여 나타내었다. Fig. 7(a)에서 보이는 것과 같이 $\beta_c = +3.0^\circ$ 로 변화시킨 제트팬의 경우, 정익의 압력면 근처에 상대적으로 낮은 속도분포를 갖는 영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 β_c 를 감소시킴으로써 작아지는 것을 Figs. 7(b)–(e)를 통해 확인할 수 있다. 또한 정익의 입구 근처에 낮은 속도분포를 갖는 영역이 발생하였으며, 이

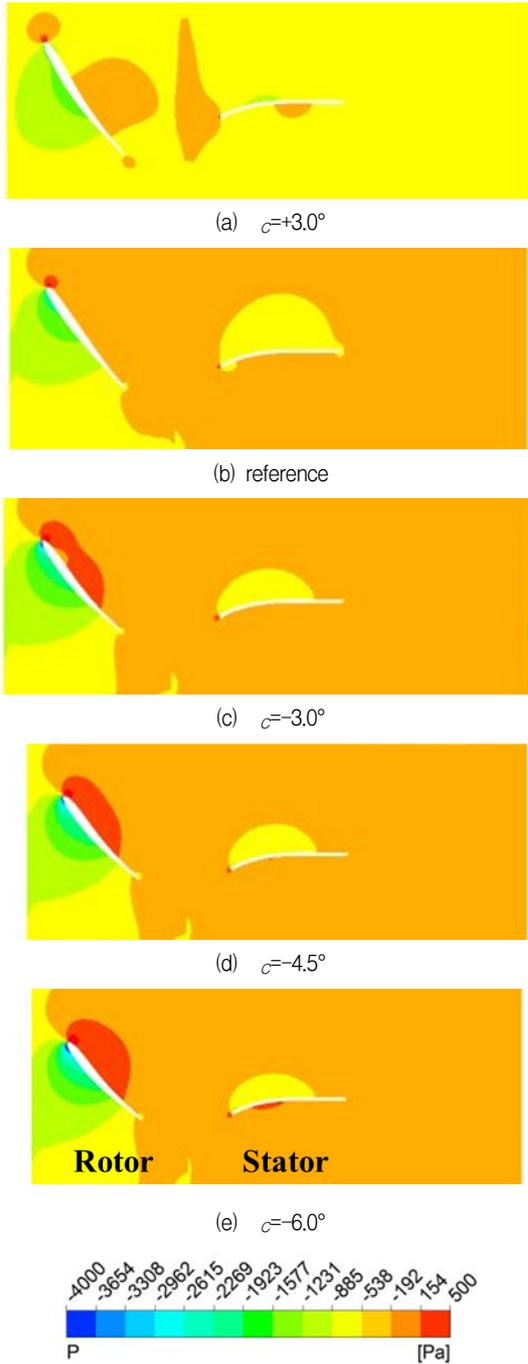


Fig. 8 Pressure contours on the 50% span for different blade pitch angles

영역은 β_c 가 -3.0° 일 때 거의 사라졌고 β_c 가 -4.5° 이하에서 다시 발생하였다. 그리고 정익의 흡입면 근처에서 β_c 를 감소 시킴에 따라 높은 속도분포를 갖는 영역(화살표)이 증가하는 것을 알 수 있다.

β_c 가 감소함에 따른 동익과 정익의 50% span에서의 압력 분포 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 다른 형상들과 비교하여 β_c 가 $+3.0^\circ$ 일 경우 Fig. 8(a)에서 보는 것과 같이 압력 값이 낮게 분포하였다. 이러한 영향으로 Fig. 5에서 확인할 수 있는 것과 같이 제트팬의 성능이 낮은 것을 알 수 있다.

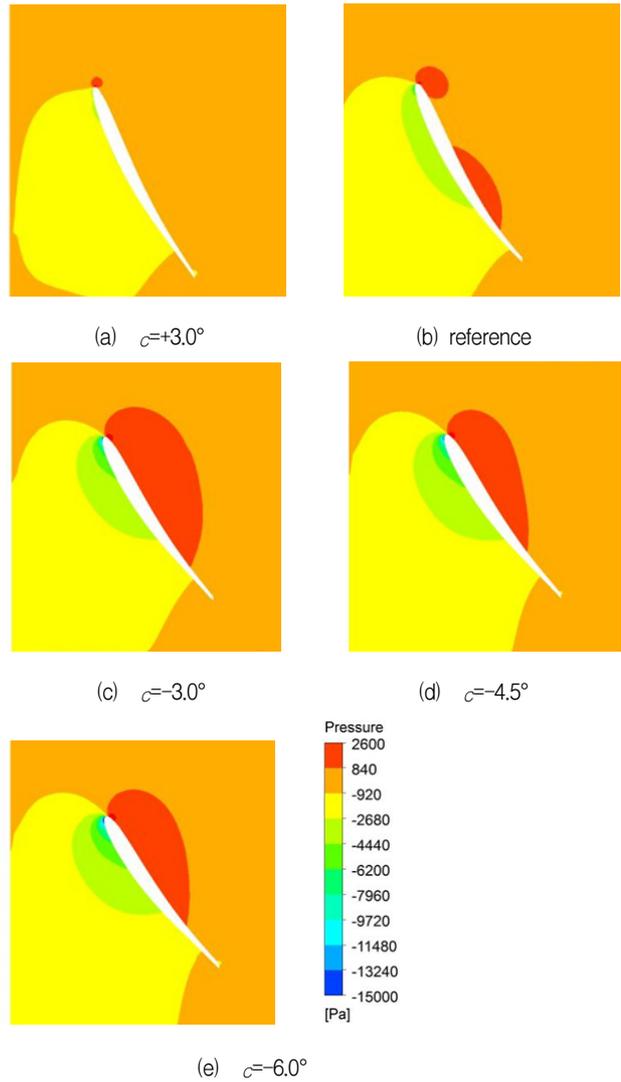


Fig. 9 Pressure contours on the 90% span for different blade pitch angles

그리고 β_c 가 감소함에 따라 동익의 압력면에 높은 값을 갖는 압력분포 영역이 점점 넓게 분포하는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 동익의 90% span에서의 압력분포를 β_c 가 변화함에 따라 비교하여 보여주고 있다. β_c 가 $+3.0^\circ$ 의 경우, 동익의 전연(leading edge) 부근에 높은 압력 값을 갖는 것을 Fig. 9(a)를 통해 확인할 수 있었다. 이 영역은 기준형상의 β_c 의 경우에서 더 넓어지는 것을 확인하였으며, 동익 흡입면에서 압력이 높은 값을 갖는 영역이 분포하는 것이 관찰되었다. 이러한 압력이 높은 값을 갖는 영역은 β_c 가 -3.0° 에서 가장 넓게 분포하였으며, β_c 를 더 감소시키면서 이 높은 압력 값을 갖는 영역이 작아지는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 10은 β_c 의 감소에 따른 동익의 90% span에서 속도 분포를 비교하여 나타낸다. 전체적으로 동익의 전연 근처에 낮은 속도 분포를 갖는 것을 보이며, 이는 β_c 가 감소함에 따라 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동익의 흡입면에서 높은 속도분포를 갖는 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있는

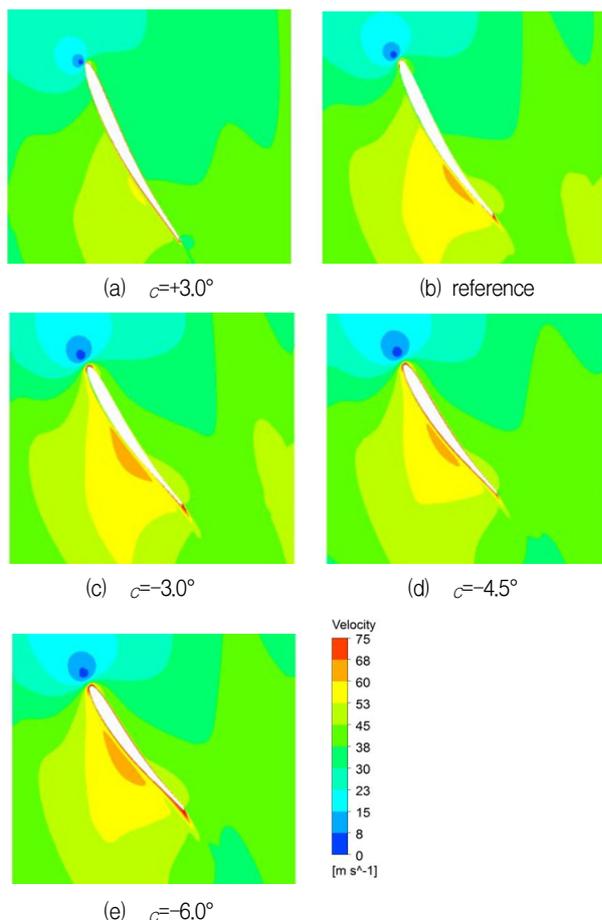


Fig. 10 Velocity contours on the 90% span for different blade pitch angles

데. 이것은 β_c 가 기준형상의 경우에 동익의 후연 (trailing edge) 부근에서 발생하지만 β_c 를 감소시켜 β_c 가 -3.0° 의 경우에 이 영역이 넓어지고 유선방향 (stream-wise)의 반대 방향, 즉 leading edge 전연 쪽으로 조금 이동하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 높은 속도분포를 갖는 영역은 β_c 가 -4.5° 이하에서 다시 줄어드는 경향을 보였다.

β_c 가 변화함에 따른 rotor 자오면(meridional plane)에서의 압력분포를 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. $\beta_c=+3.0^\circ$ 의 경우 Fig. 11(a)에서 확인할 수 있는 것과 같이 동익의 후연에 낮은 압력분포가 매우 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 낮은 압력 값을 갖는 영역은 β_c 가 $+3.0^\circ$ 에서 동익의 중간부근부터 발생하는 것을 관찰할 수 있는데 이것은 β_c 를 감소시킴으로써 후연으로 이동한 것을 Figs. 11(b)-(e)를 통해 알 수 있었다. 또한, 이러한 낮은 압력 값을 갖는 영역은 β_c 가 감소함에 따라 줄어드는 경향을 보였고, β_c 가 -4.5° 이하일 경우 넓어진 것을 확인할 수 있었다. 그리고 rotor 입구부의 익단 근처에서 높은 압력 값을 갖는 영역이 관찰되었으며, 이는 β_c 가 감소함에 따라 넓어지는 경향을 보이며 β_c 가 -3.0° 에서 가장 넓게 분포하는 것을 알 수 있었고, β_c 가 -4.5° 이상에서는 줄어드는 것을 확인하였다.

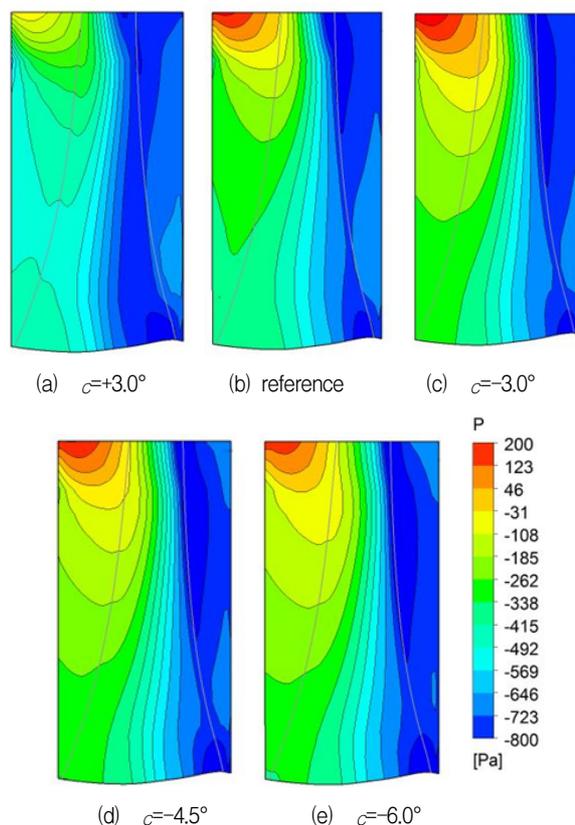


Fig. 11 Pressure contours on the meridional plane of rotor blade for different pitch angles

Fig. 12는 동익의 익단 간극영역에서 β_c 의 변화에 따른 전압분포의 변화를 비교하여 보여준다. 동익의 익단 간극 영역에서의 유동은 일반적으로 팬의 압력상승을 저해시키는 요인으로 작용할 수 있으며, 익단 간극에서의 유동손실을 최소화시키기 위한 설계가 요구된다. Fig. 12(a)는 β_c 가 $+3.0^\circ$ 의 경우를 나타내고 있다. 다른 형상들과 비교하여 전체적으로 전압 분포 값이 큰 것을 확인할 수 있으며 이는 팬의 성능을 저하시키는 요인이 될 수 있다. 이것은 β_c 를 감소시켜 손실을 감소시킬 수 있다는 것을 Figs. 12(b)-(e)를 통해 확인할 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 β_c 가 감소함에 따라 익단 간극에서의 전압 값이 상대적으로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 13은 동익 위에서의 압력 분포를 β_c 의 변화에 따라 비교하여 나타내었다. 동익의 압력면에서는 β_c 가 감소함에 따라 압력 값이 증가하는 경향을 보여준다. 또한 동익 흡입면에서는 β_c 가 감소함에 따라 압력 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 디퓨저 확장각도의 영향성 분석

본 연구에서는 일방향 제트팬의 디퓨저 확장각도의 영향

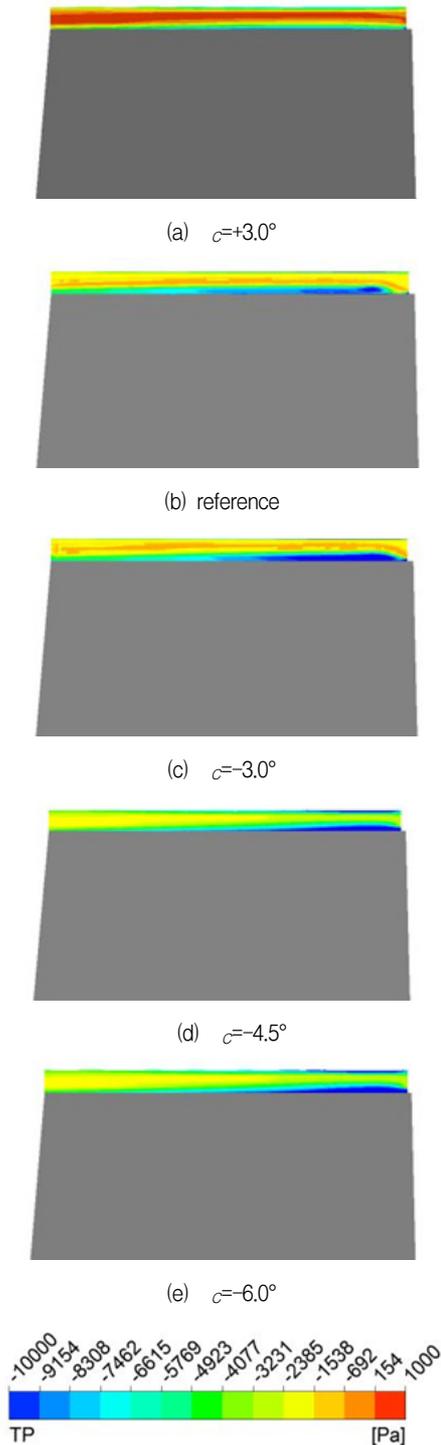


Fig. 12 Total pressure contours at the 익단 region of rotor blade for different pitch angles

성을 조사하기 위해 Fig. 14에서 보는 것과 같이 디퓨저 확장각도(θ)를 변경하였다. 제트팬의 내경 D_i 와 제트팬의 외경 D_o 를 고정하였고 각도에 따른 디퓨저의 길이는 14° 일 때 401 mm, 16° 일 때 348 mm 그리고 21° 일 때 260 mm로 세 가지 경우에 대해 변화시켰으며 이에 따른 제트팬의 전압력과 효율의 변화를 Table 3과 같이 비교하였다. θ 의 증가에

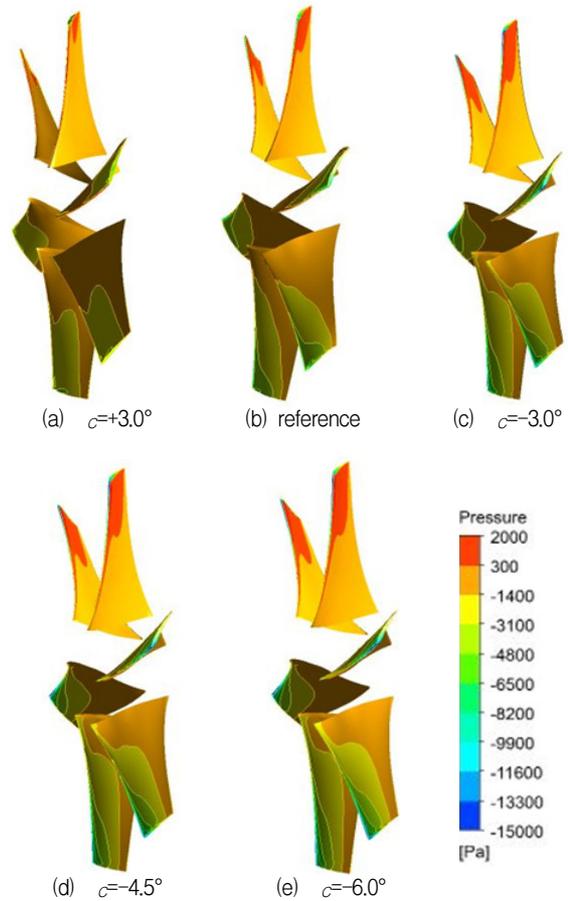


Fig. 13 Pressure contours on the rotor blade for different pitch angles

따라 전압력 값은 감소하는 경향을 보이고 효율 값도 감소하였다. θ 가 14° 와 16° 를 비교할 경우, θ 의 2° 증가로 인해 효율이 약 0.7% 줄어드는 결과를 나타내었다.

Fig. 15는 동익을 지난 이후에 θ 의 변화에 따른 x-y평면 위에서의 속도장을 보여준다. 디퓨저 확장 부근에서 국부적으로 저속도 영역(A)이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 저속도 구간이 발생하는 것은 Figs. 15 (a)~(c)에서 보는 것과 같이 디퓨저 확장에 의한 2차 유동 발생에 기인한 것이다. 이러한 2차 유동의 크기는 θ 를 증가시킬수록 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15의 사각형 A 구간 내에서의 압력 분포를 Fig 16에 나타내었다. 정압분포는 유동방향으로 디퓨저를 따라 잘 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 디퓨저 확장각도를 증가시키기에 따라 높은 정압분포를 갖는 영역이 후류로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 일방향 제트팬을 대상으로 삼차원 RANS 해석을 수행하였다. 동익의 피치각과 디퓨저 확장각도를 형상 변수로 선택하여 일방향 제트팬의 공력 성능에 대한 영향

성을 평가하였다. 슬림형 제트팬은 AMCA 210-99의 흡입챔버 멀티노즐 시험장치에 따라 공기기관에서 성능시험을 실시하였으며, 이 때 얻어진 전압효율은 Table 2에 나타난 바와 같이 86.9 %로 고효율의 성능을 확인하였다. 이 효율은 유동해석을 통하여 얻어진 효율과 약 1.6%의 차이를 보이므로 성능시험 및 유동해석은 매우 신뢰할 만한 것으로 평가된다. 또한 성능시험 시 조립된 블레이드의 각도를 중심으로 CFD 유동해석을 통하여 각도변화에 따른 성능을 예측하였다. 기존 제트팬의 피치각을 기준으로 $+3.0^{\circ} \sim -6.0^{\circ}$ 로 변경하여 성능 및 효율의 영향성을 관찰 한 결과 β_c 를 3.0° 증가시킬 경우 효율이 현저히 감소하는 것을 확인하였다. 또한 3.0° 감소시킬 경우 기준형상과 비교하여 효율이 약 1% 증가하여 최대 효율을 갖는 것을 알 수 있었다.

디퓨저 확장각을 변화시킬 경우 θ 가 14° 에서 가장 좋은 성능을 보였으며, θ 를 증가시킬 경우 디퓨저 확장부분에 유동 박리현상이 발생하는 부분이 증가하면서 제트팬 효율이 감소하는 것을 확인하였다.

본 연구결과는 성능시험과 전산유체역학 유동해석을 통하여 슬림형 제트팬의 전압효율이 86~88%로 매우 고효율임을 확인하였다. 이 연구결과를 바탕으로 한국설비기술협회의 송풍기에너지효율등급(FEG, fan efficiency grade, SPS-KARSE B 0052) 인증 규정에 따라 최고효율등급인 FEG 90을 획득하였고, 특허 등록(제 10-1239677)과 경기지방중소기업청에서 성능인증(EPC, excellent performance certification, 제15-1330호)을 획득하여 세계 최고 수준의 제트팬임을 입증하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 향후 일방향 고정압 축류팬의 고효율화 개발과 컴팩트형 일방향 슬림형 제트팬의 시리즈 개발을 위한 설계에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며

이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- (1) Chun, G., Mingnian, W., and Zhaozhi, T., 2011, "A Study on Surge and Stall under the Interaction of parallel Axial Flow Fan in Tunnel," *Noise & Vibration Worldwide*, Vol. 42, Issue 11, pp. 9~14.
- (2) Karki, K. C., Patankar, S. V., Rosenbluth, E. M., and Levy, S. S., 2000, "CFD Model for Jet Fan Ventilation Systems," *Proceedings of the 10th International Symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels Principles, Analysis and Design*, Boston, USA, 29 Pages.
- (3) Se, C. M. K., Lee, E. W. M., and Lai, A. C. K., 2012, "Impact of Location of Jet Fan on Airflow Structure in Tunnel Fire," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 27, pp. 30~40.
- (4) Betta, V., Cascetta, F., Musto, M., and Rotondo, G., 2009, "Numerical Study of the Optimization of the Pitch Angle of an Alternative Jet Fan in a Longitudinal Tunnel Ventilation System," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24, pp. 164~172.
- (5) Mutatma, K. R. and Hall, A. E., 1996, "The Experimental Investigation of Jet Fan Aerodynamics Using Wind Tunnel Modeling," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, pp. 322~328.
- (6) 양상호, 김경엽, 최영석, 김진혁, 2016, "초장대 해저터널 배연을 위한 고정압 축류팬 개발," 2016 유체기계학회 연구개발 발표회 논문집, 부산, pp. 99~100.
- (7) Choi, Y. S., Kim, J. H., Lee, K. Y., and Yang, S. H., 2010, "Performance Improvement of High Speed Jet Fan," *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 39~49.
- (8) 양상호, 김경엽, 이상표, 김남구, 2013, "고효율 컴팩트형 제트팬 개발," 2013 유체기계 연구개발 발표회 논문집, 제주, pp. 134~135.
- (9) ANSYS CFX 16.0, ANSYS CFX Tutorials, 2015, ANSYS Inc.